

Dem Wasserstoff auf der Spur

Teil 3- Wasserstoffinduzierte Werkstofftrennungen und deren Folgen

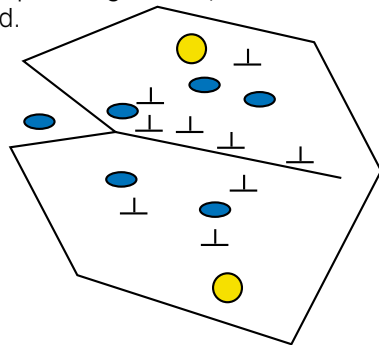
Dr.-Ing. Simone Schwarz



Wie bereits in der letzten Ausgabe berichtet, haben sich in den letzten Jahren verschiedene Mechanismen zum Verständnis der wasserstoffinduzierten Werkstofftrennung entwickelt. Das mit Abstand jüngste Mechanismusmodell ist der sogenannte Help-Mechanismus.

Help-Mechanismus (hydrogen enhanced local plasticity)

Voraussetzung beim Help-Mechanismus ist wie auch beim Dekohäsionsmodell (WB 4/99) die Ansammlung von Wasserstoff in Spannungsbereichen, zum Beispiel in Rißspitzenumgebungen oder in den Spannungsfeldern von Versetzungen (Träger der plastischen Verformung im Metallgitter). Bei der Initiierung einer Versetzungsbewegung durch Anlegen einer äußeren Spannung erleichtert der vorhandene atomare Wasserstoff die Versetzungsbewegung wesentlich durch die Abschirmung der Spannungsfelder der Versetzungen untereinander sowie zu anderen Gitterdefekten, Bild 1. Es wird daher eine lokale Versetzungsbewegung bereits bei niedrigeren Schubspannungen erfolgen, was durch eine lokale Herabsetzung der Fließspannung durch Wasserstoff verursacht wird. Es kommt zu einer Gleitlokalisierung, die durch Mikroporenbildung und Scherung zu einem Mikroriß führt. Sobald der Riß das Gebiet der lokal herabgesetzten Fließspannung verläßt, kommt er zum Stillstand.



Die Gleitlokalisierungen, Mikroporenbildungen bis hin zu Mikrorissen zeigen sich nahezu auf allen wasserstoffinduzierten Sprödbruchflächen als kurze Mikroverformungslinien, die zumeist in Mikroporennähe zum Beispiel auf interkristallinen Spaltflächen verlaufen. Sie wurden in der Vergangenheit häufig als „Krähenfüße“ bezeichnet und sind wohl das markanteste Zeichen für wasserstoffinduzierten Sprödbruch.

Following the Trail of Hydrogen

Part 3: Hydrogen Induced Material Separation And Its Consequences

By Dr. Ing. Simone Schwarz

As previously reported, various processes towards understanding of hydrogen induced material separation have been developed in recent years. The most recent process model by far is the so-called HELP process.

HELP (Hydrogen Enhanced Local Plasticity) Process

A prerequisite for the HELP process is, as is the case with the decohesion model (WB 4/99), the accumulation of hydrogen in the field of stress, for instance, in the vicinity of the tips of cracks or in the stress areas of dislocations (carriers of plastic deformation in a metal grid). During the initiation of a dislocation movement by introducing external stresses, the existing active hydrogen considerably eases the dislocation movement through shielding the fields of stress of the dislocations against each other as well as against other grid defects (see Fig. 1). Therefore, a local dislocation movement will already occur at low levels of shearing stress, which is caused by a local drop of yield stress due to hydrogen. A sliding localization occurs, leading to a micro crack caused by the formation of micro pores and shearing action. As soon as the crack leaves the area of reduced yield stress, it will not propagate any further.

Sliding localization and formation of micro pores up to micro cracks can be found in nearly all hydrogen induced brittle fracture surfaces in form of short micro deformation lines, running mostly in the vicinity of micro pores, i.e. on inter-crystalline separation surfaces. In the past, they were often referred to as "crow's feet" and they are probably the most striking sign for a hydrogen induced brittle fracture.

Mechanical Behavior of Material Under the Influence of Hydrogen – Critical Hydrogen Content

The influence of hydrogen is very much in evidence in the area of plastic deformation. In case of static loads, the reduction of ductility is pronounced, while in case of cyclic loads a drastic increase in the crack propagation speed, respectively the decrease of fracture toughness, occurs.

This reduction of ductility due to hydrogen, which may also occurs with a time delay, is usually a characteristic indicator for the hydro-

Bild 1: Schematische Darstellung des Help-Mechanismus

Fig. 1: Schematic diagram of the HELP process

Mechanisches Werkstoffverhalten unter Wasserstoffeinfluß – kritischer Wasserstoffgehalt

Der Einfluß von Wasserstoff tritt am stärksten im Bereich der plastischen Deformation in Erscheinung. Bei statischer Beanspruchung ist der Rückgang der Duktilität markant, während bei zyklischer Beanspruchung eine drastische Zunahme der Rissausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Abnahme der Bruchzähigkeit auftritt.

Diese Duktilitätsverminderung durch den Wasserstoff, die auch zeitverzögernd eintreten kann, ist zumeist ein charakteristisches Merkmal für die Wasserstoffempfindlichkeit eines Werkstoffzustands. Die vorliegende Gitterstruktur eines Werkstoffs und sein Wärmebehandlungszustand bestimmen dabei nicht nur die Diffusionsgeschwindigkeit für atomaren Wasserstoff, sondern auch dessen maximale Aufnahmefähigkeit (Löslichkeit). Je niedriger die maximale Wasserstofflöslichkeit in einem Werkstoff ist, desto geringer ist auch die Wasserstoffmenge, die zur Eigenschaftsbeeinflussung erforderlich ist.

Bei welchem kritischen Wasserstoffgehalt eine signifikante Eigenschaftsbeeinträchtigung bis hin zum Sprödbbruch erfolgt, ist jedoch nicht nur davon abhängig ob z.B. ein ferritisch-perlitischer, martensitischer oder austenitischer Stahl vorliegt, sondern auch von der Belastungsart und -höhe, dem dieser Stahl bzw. Werkstoff ausgesetzt ist. Trifft zusätzlich zu einem hohen Wasserstoffangebot durch ein Umgebungsmedium noch eine zügige oder zyklische Werkstoffbeanspruchung auf, so zeigt sich eine weitaus schnellere Duktilitätsabnahme durch die bereits beschriebene Wasserstoffanreicherung in Zugspannungsgebieten.

Dies wird sehr deutlich an einem austenitischen Werkstoff erkennbar, der ja gegenüber einem ferritischen Werkstoff eine wesentlich bessere plastische Verformbarkeit aufweist. In Bild 2 sind Spannungs-Dehnungskurven von Zugproben nach unterschiedlich starker Wasserstoffaufnahme dem belastungsfreien Zustand gegenübergestellt. Die Dehnungswerte fallen auf ein Zehntel des ursprünglichen Werts zurück.

Es ist daher bei der Beurteilung der Versprödungsempfindlichkeit von Werkstoffen unter oder nach Wasserstoffeinwirkung stets das Zusammenwirken des Werkstoffzustands (Kristallstruktur, Härte), der Wasserstoffbelastung und der Beanspruchung (Spannungsamplitude, Belastungsart) zu bewerten. In Bild 3 werden diese drei Einflussfaktoren grafisch dargestellt. Der kritische Bereich ist farblich als Schnittmenge aller drei Einflussfaktoren gekennzeichnet. Unter diesen Bedingungen kommt es zu einem wasserstoffinduzierten Sprödbbruch.

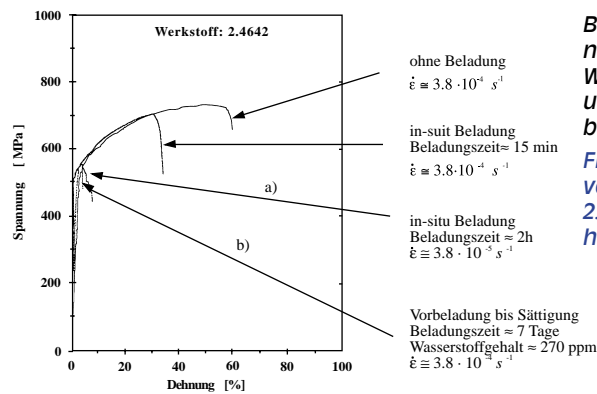


Bild 2: Spannungs-Dehnungskurven des Werkstoffs 2.4642 mit und ohne Wasserstoffbelastung

Fig. 2: Stress-strain curves of the material 2.4642 with or without hydrogen loads

gen sensitivity of a material condition. Here, the present grid structure of a material and its heat treatment condition not only determine the diffusion speed for active hydrogen, but also its maximum absorbing capacity (solubility). The lower the maximum hydrogen solubility in a material, the lower the hydrogen volume necessary to influence the characteristics.

However, the point of critical hydrogen content at which a significant impairment of characteristics, up to a brittle fracture, occurs does not only depend on, for instance, whether the steel in question is ferritic-pearlitic, martensitic or austenitic, but also on the type and amount of the load to which the steel or material is being subjected. If, in addition to a high volume of hydrogen due to an ambient medium, the material is also subject to continuous or cyclic loads, a considerable quicker reduction of ductility can be observed due to the already described enrichment of hydrogen in the areas subject to tensile stresses.

This becomes clearly apparent with an austenitic material, which, as we know, exhibits considerably better plastic deformation properties in comparison to a ferritic material. Fig. 2 shows a comparison of stress-strain curves of tensile test specimens after different levels of hydrogen absorption vs. no load condition. The expansion values decrease to one tenth of their original value.

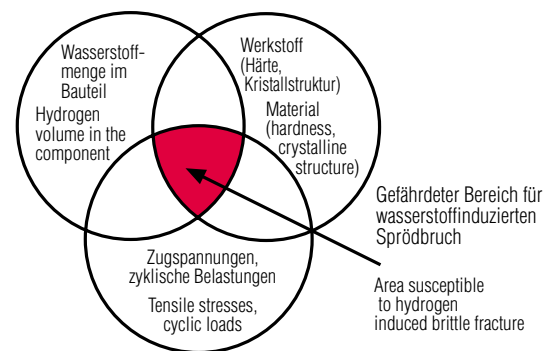


Bild 3: Einflussfaktoren für die Bewertung der Wasserstoffempfindlichkeit eines Werkstoffs oder Bauteils

Fig. 3: Influencing factors for the evaluation of a material's or component's sensitivity to hydrogen

Thus, when assessing the sensitivity to brittleness of a material under or after the influence of hydrogen, the interaction of the material condition (crystalline structure, hardness), the hydrogen volume and the load (stress amplitude, type of load) must always be included in the evaluation. Fig. 3 shows a graphic representation of these three influencing factors. The critical area is marked in color as an intersection of all three influencing factors. Under these conditions, a hydrogen induced brittle fracture will occur.